

УДК 004.94

Д. В. Федасюк, д. т. н., проф.; Т. О. Муха

МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КИПІННЯ РІДИНИ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ ЗА КРИТИЧНИХ УМОВ В МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ

У статті побудовано нестационарну нелінійну модель процесу теплообміну в мікроелектронних пристроях з використанням кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення в критичних умовах. Для аналізу моделі використано сукупність числових методів, що дало можливість отримати числовий розв'язок. На основі побудованої моделі досліджено зміну температури та зміну потоків тепла, які відводяться з поверхні пристрою, у часі і вплив процесу кипіння на тепловідведення.

Ключові слова: теплообмін, кипіння, нелінійна модель, числові методи, моделювання.

Постановка проблеми

Зростання тепловиділення, яке спостерігається протягом останніх десятиліть внаслідок мініатюризації електронних компонентів, накладає обмеження на потужність та швидкодію електронних пристроїв, тому важливим завданням є відведення тепла для забезпечення відповідного температурного режиму. Якщо ж тепловідведення є недостатнім для забезпечення відповідного температурного режиму, то температура пристрою зростає, що загрожує виходом з ладу. За таких критичних умов виникає потреба в додатковому відведенні тепла, яке б дало змогу швидко зменшити температуру охолоджуваного елемента.

Швидке охолодження забезпечує один із сучасних підходів до відведення тепла, який передбачає використання речовини у зміненому стані з рідкого на газоподібний. Під час зміни агрегатного стану речовини відбувається відведення тепла у вигляді прихованої енергії пароутворення рідини. Тепловідведення в такий спосіб характеризується високими коефіцієнтами тепловіддачі. Воно включає випаровування рідини в гарячій зоні та конденсацію пари в холодній зоні і забезпечує відведення набагато більших теплових потоків, ніж ті, які відводяться внаслідок вимушеної конвекції повітря чи рідини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомі дослідження процесу відведення тепла з використанням випаровування характеризуються широким різноманіттям. Частина дослідників зосереджує увагу лише на процесі випаровування [1 – 5], а теплообмін залишається поза увагою. Інші науковці досліджують лише процес стаціонарного теплообміну [6 – 8], що обмежує їхнє використання для аналізу нестационарного процесу теплообміну. Деякі науковці під час побудови математичних моделей роблять припущення, які суттєво спрощують модель [9, 10], однак це впливає на адекватність результатів.

У роботі [11] побудовано модель процесу теплообміну з врахуванням впливу випаровування рідини на процес відведення тепла. Однак під час побудови моделі зроблено припущення про відсутність кипіння рідини та про те, що випаровування відбувається за рахунок дифузії.

Внаслідок зазначених особливостей виникає необхідність побудови математичної моделі аналізу процесу теплообміну з використанням кипіння рідини для додаткового тепловідведення за критичних умов у мікроелектронних пристроях (МЕП).

Мета дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі процесу теплообміну в

мікроелектронних пристроях з використанням кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення в критичних умовах.

Опис завдання

Розглядається МЕП, конструкція якого зображена на рис. 1 [12]. На підкладці встановлений захищений корпусом кристал. Відведення тепла від МЕП в навколишнє середовище забезпечує приєднана до корпусу кристалу тепловідвідна пластина. Для покращення теплового контакту між пластиною та корпусом знаходиться теплопровідна паста. Коли температура корпусу перевищує критичну, то на поверхню тепловідвідної пластини подається рідина, яка в результаті кипіння забезпечує додаткове відведення тепла.

Для МЕП виробниками задається або потужність тепловиділення, яка повинна бути відведена [13, 14], або тепловий потік, який виділяє МЕП. При цьому температура корпусу МЕП не повинна перевищувати попередньо задану допустиму температуру [15]. Температура корпусу МЕП перевищує критичну у випадку, коли тепловідведення є недостатнім для того, щоб розсіяти тепло, яке виділяється МЕП. Для відведення виділеного МЕП тепла за критичних умов використовується непряме рідинне охолодження з використанням кипіння рідини, оскільки такий підхід дає можливість уникати контакту рідини, яка кипить, з МЕП. У [16] показано, що використання для кожного тепловиділяючого елемента окремої тепловідвідної пластини є найефективнішим щодо тепловідведення.



Рис. 1. Конструкція МЕП

Під час моделювання враховується два режими теплообміну: 1) за звичайних умов, коли тепловідведення відбувається за рахунок конвекції; 2) під час кипіння рідини, яка подається на поверхню за умови перевищення критичної температури. Кипіння рідини забезпечує додаткове тепловідведення за критичних умов в МЕП. Теплову модель МЕП представлено у вигляді нескінченної пластини (рис. 2) товщиною D . Пластину знизу нагріває потік тепла величиною q_0 . Поки температура є меншою за критичну, то тепло відводиться з поверхні пластини за рахунок конвекції. У початковий момент часу пластина має однорідну температуру T_b . Коли температура нижньої поверхні пластини стає більшою за T_{cr} , на верхню поверхню виливається рідина, яка в результаті кипіння відводить тепло. Утворений шар рідини має набагато меншу товщину, ніж товщина пластини. Температура навколишнього середовища – T_∞ , атмосферний тиск – P_{atm} . Коефіцієнт теплопровідності, густина і питома теплоємність пластини залежать від температури. Під час побудови моделі зроблено припущення [17, 18], що теплообмін відбувається лише вздовж осі x , оскільки зазвичай товщина пластини набагато менша за ширину та довжину.

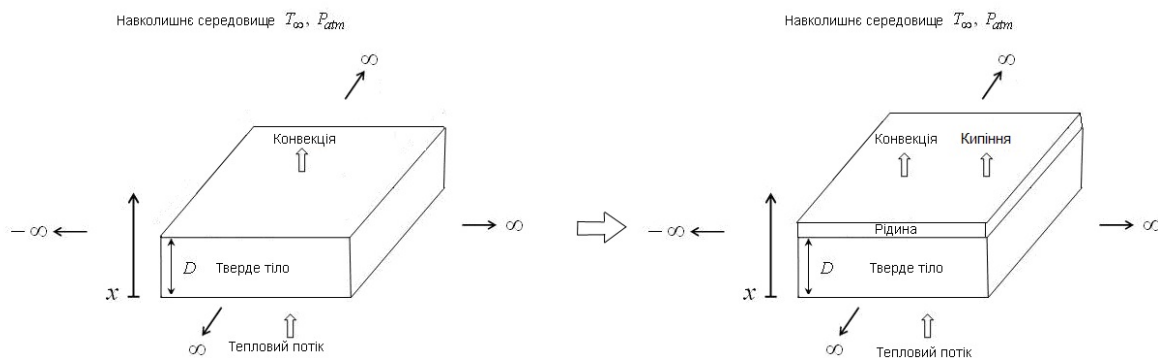


Рис. 2. Теплова модель МЕР

Процес теплопровідності у звичайному режимі описано таким нелінійним диференціальним рівнянням в частинних похідних та початковою і граничними умовами:

$$c_s(T_1)\rho_s(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right), \quad (1)$$

$$k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = -q_0'', \quad (2)$$

$$-k(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=D} = q_{conv}'', \quad (3)$$

$$T_1(x, t=0) = T_b, \quad (4)$$

де $T_1 = T_1(x, t)$ – температура пластини в точці з координатою x в момент часу t у звичайному режимі; $k(T_1)$, $c_s(T_1)$, $\rho_s(T_1)$ – коефіцієнт теплопровідності $[Bm/m \cdot K]$, питома теплоємність $[Дж/кг \cdot K]$ і густина $[кг/м^3]$ відповідно, q_0'' – величина потоку тепла, який передається від МЕР до тепловідвідної пластини $[Bm/m^2]$, q_{conv}'' – потік тепла, який відводиться від поверхні за рахунок конвекції $[Bm/m^2]$, T_b – початкова температура пластини $[K]$.

При використанні кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення процес теплопровідності в критичному режимі описується такими рівняннями:

$$c_s(T_2)\rho_s(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad (5)$$

$$k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=0} = -q_0'', \quad (6)$$

$$-k(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=D} = q_{conv}'' + q_{boil}'', \quad (7)$$

$$T_1(x, t=t_{cr}) = T_2(x, t=t_{cr}), \quad (8)$$

де $T_2 = T_2(x, t)$ – температура пластини в точці з координатою x в момент часу t при критичному режимі, q_{boil}'' – потік тепла, який відводиться від поверхні за рахунок кипіння $[Bm/m^2]$.

Потік тепла, який відводиться за рахунок конвекції згідно із законом Ньютона,

обчислюється за допомогою рівняння:

$$q''_{conv} = h(T_i(D, t) - T_\infty), \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

де h – коефіцієнт конвективного теплообміну з навколишнім середовищем $[Вт/м^2 \cdot К]$, T_∞ – температура навколишнього середовища, $i = 1$ для звичайного режиму та $i = 2$ для критичного режиму.

Потік тепла, який відводиться за рахунок кипіння рідини, обчислюється [17]

$$q''_{boil} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3, \quad T_2 \geq T_{boil} + 5, \quad (10)$$

де h_{fg} – питома теплота випаровування рідини $[Дж/кг]$, μ_l – в'язкість рідини $[кг/с \cdot м]$, g – прискорення вільного падіння $[м/с^2]$, ρ_l , ρ_v – густина речовини, яка кипить, у рідкому та газоподібному станах $[кг/м^3]$ відповідно, σ – поверхневий натяг рідини $[Н/м]$, $c_{p,l}$ – питома теплоємність рідини при сталому тиску, ΔT_e – різниця між температурою верхньої поверхні пластини й температурою кипіння рідини, $C_{s,f}$, n – константи, які розраховуються експериментальним шляхом для кожної пари поверхня-рідина, Pr_l – число Прандтля для рідини.

Для аналізу нелінійної нестационарної моделі процесу теплообміну в МЕП з використанням кипіння використано сукупність числових методів: для дискретизації за часом – метод Рунге, для просторової дискретизації – метод сіток.

Особливістю застосування методу сіток до нелінійної математичної моделі теплообміну в МЕП з використанням кипіння для інтенсифікації тепловідведення є необхідність використання ітераційних методів для розв'язування системи нелінійних диференціальних рівнянь.

Результати моделювання

Під час моделювання використано такі значення вхідних параметрів модельного експерименту та значення теплофізичних властивостей:

$$T_b = 293 \text{ } ^\circ K, \quad T_\infty = 293 \text{ } ^\circ K, \quad D = 0,01 \text{ м}, \quad q''_0 = 100000 \text{ } [Вт/м^2].$$

Матеріал тепловідвідної пластини – мідь:

$$k_s = 401 \text{ } [Вт/м \cdot К], \quad c_s = 8933 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad \rho_s = 385 \text{ } [кг/м^3].$$

Етиловий спирт [19]:

$$h_{fg} = 846000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,000592 \text{ } [кг/с \cdot м] \text{ [20]}, \quad \rho_l = 757, \quad \rho_v = 1,44 \text{ } [кг/м^3], \\ \sigma = 0,0177 \text{ } [Н/м] \text{ [17]}, \quad c_{p,l} = 2470 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad C_{s,f} = 0,0027, \quad n = 1,7, \quad Pr_l = 8,12 \text{ [21]}, \\ T_{boil} = 351 \text{ } ^\circ K.$$

Ацетон [22]:

$$h_{fg} = 501000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,000316 \text{ } [кг/с \cdot м] \text{ [23]}, \quad \rho_l = 790, \quad \rho_v = 2,33 \text{ } [кг/м^3], \\ \sigma = 0,02346 \text{ } [Н/м], \quad c_{p,l} = 2150 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad C_{s,f} = 0,013 \text{ [24]}, \quad n = 1,7, \quad Pr_l = 4,22, \\ T_{boil} = 330 \text{ } ^\circ K.$$

FC-72 [25]:

$$h_{fg} = 88000 \text{ } [Дж/кг], \quad \mu_l = 0,00064 \text{ } [кг/с \cdot м], \quad \rho_l = 1680, \quad \rho_v = 13,55 \text{ } [кг/м^3], \quad \sigma = 0,01 \\ [Н/м], \quad c_{p,l} = 1100 \text{ } [Дж/кг \cdot К], \quad C_{s,f} = 0,0055 \text{ [26]}, \quad n = 1,7, \quad Pr_l = 12,35, \quad T_{boil} = 329 \text{ } ^\circ K.$$

FC-87 [27]:

$h_{fg} = 103000 \text{ [Дж/кг]}$, $\mu_l = 0,00045 \text{ [кг/с} \cdot \text{м]}$, $\rho_l = 1650$, $\rho_v = 11,55 \text{ [кг/м}^3\text{]}$, $\sigma = 0,009 \text{ [Н/м]}$, $c_{p,l} = 1100 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}$, $C_{s,f} = 0,0055$ [26], $n = 1,7$, $Pr_l = 8,84$, $T_{boil} = 303 \text{ }^\circ\text{K}$.

Вода [17]:

$h_{fg} = 2257000 \text{ [Дж/кг]}$, $\mu_l = 0,000279 \text{ [кг/с} \cdot \text{м]}$, $\rho_l = 1044$, $\rho_v = 1,679 \text{ [кг/м}^3\text{]}$, $\sigma = 0,0589 \text{ [Н/м]}$, $c_{p,l} = 4217 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}$, $C_{s,f} = 0,0128$, $n = 1,0$, $Pr_l = 1,76$, $T_{boil} = 373 \text{ }^\circ\text{K}$.

На рис. 3 показано зміну температури тепловідводу на нижній поверхні у часі, оскільки на нижній поверхні пластини температура є найвищою. На відміну від випаровування, яке відбувається при будь-якій температурі, кипіння рідини можливе лише тоді, коли температура тепловідвідної пластини стає більшою за температуру кипіння. Тому рідина подається в момент, коли температура пластини перевищує температуру кипіння. Після цього температура пластини зростає повільніше, оскільки тепло додатково відводиться за рахунок кипіння рідини. Зростання температури припиняється, коли різниця між температурою на верхній поверхні пластини та температурою кипіння рідини стає такою, що забезпечує відведення необхідного потоку тепла. Чим нижча температура кипіння рідини, тим нижча температура встановлюється при використанні кипіння для інтенсифікації тепловідведення.

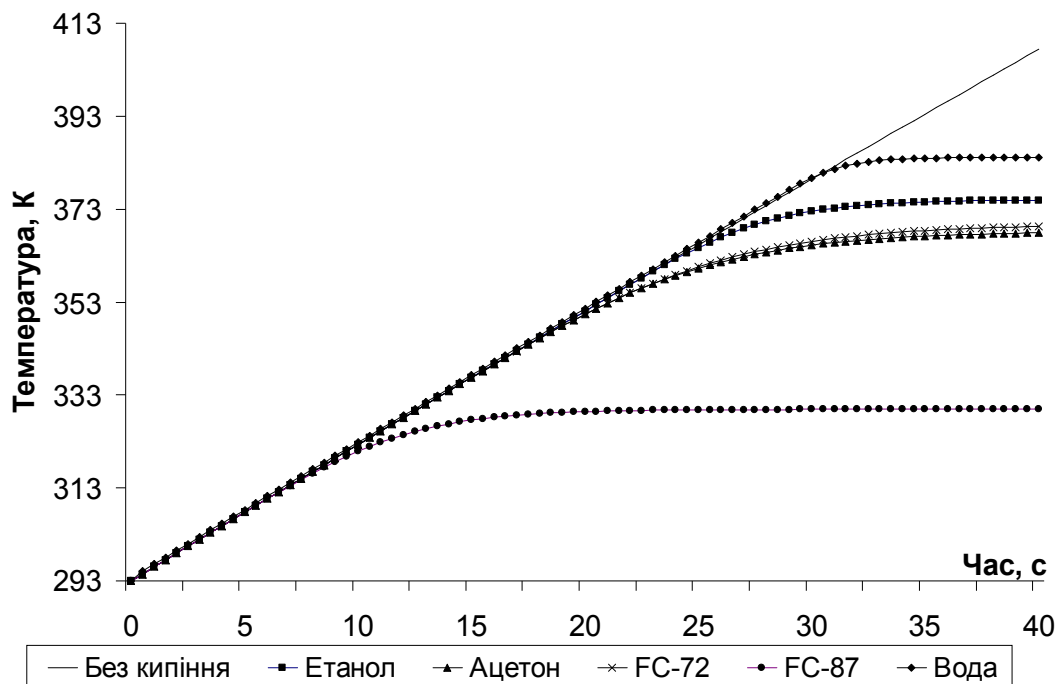


Рис. 3. Зміна температури при використанні кипіння

На рис. 4 показано зміну величин потоків тепла, які відводяться тепловідвідною пластиною в навколишнє середовище, у часі при використанні кипіння різних рідин для інтенсифікації тепловідведення. До початку кипіння рідини тепло відводиться за рахунок конвективного теплообміну між поверхнею тепловідводу та навколишнім повітрям. При цьому потоки тепла, що відводяться, є невеликими порівняно з тими, які відводяться під час кипіння рідини. Після подання рідини на поверхню пластини тепловідведення різко зростає, доки не досягне значення, яке рівне величині потоку тепла, що виділяється тепловиділяючим елементом.

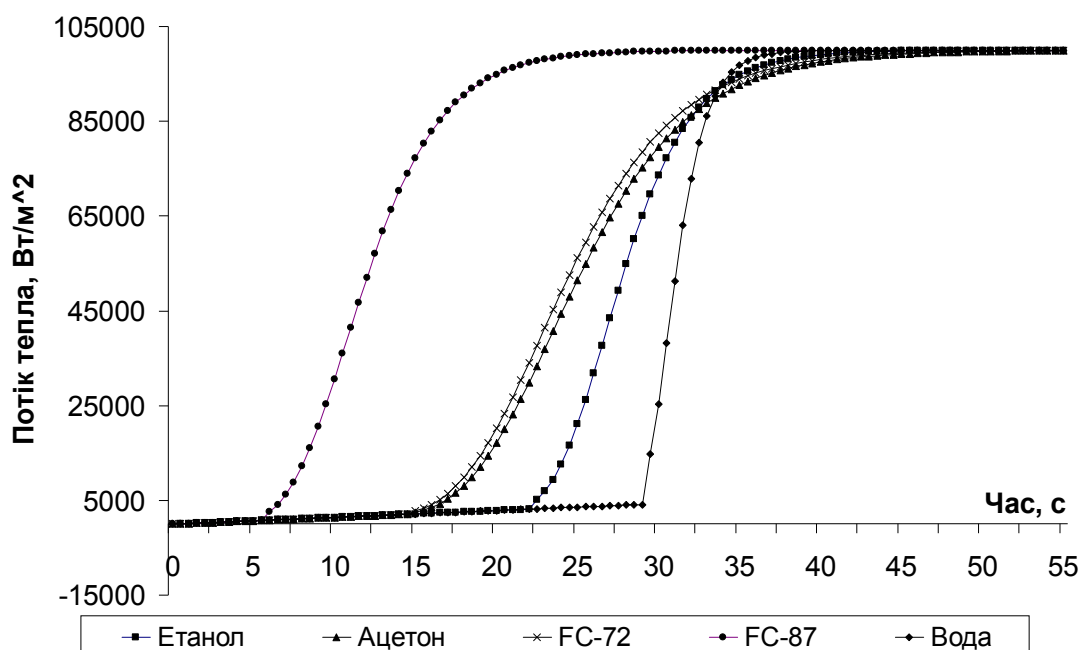


Рис. 4. Потоки, які відводяться при використанні кипіння рідин для додаткового тепловідведення

Оскільки рідина FC-87 забезпечує найнижчу температуру серед рідин, які використовувались під час дослідження, то аналіз впливу величини потоку q_0'' на зміну температури з часом здійснювався з використанням цієї рідини.

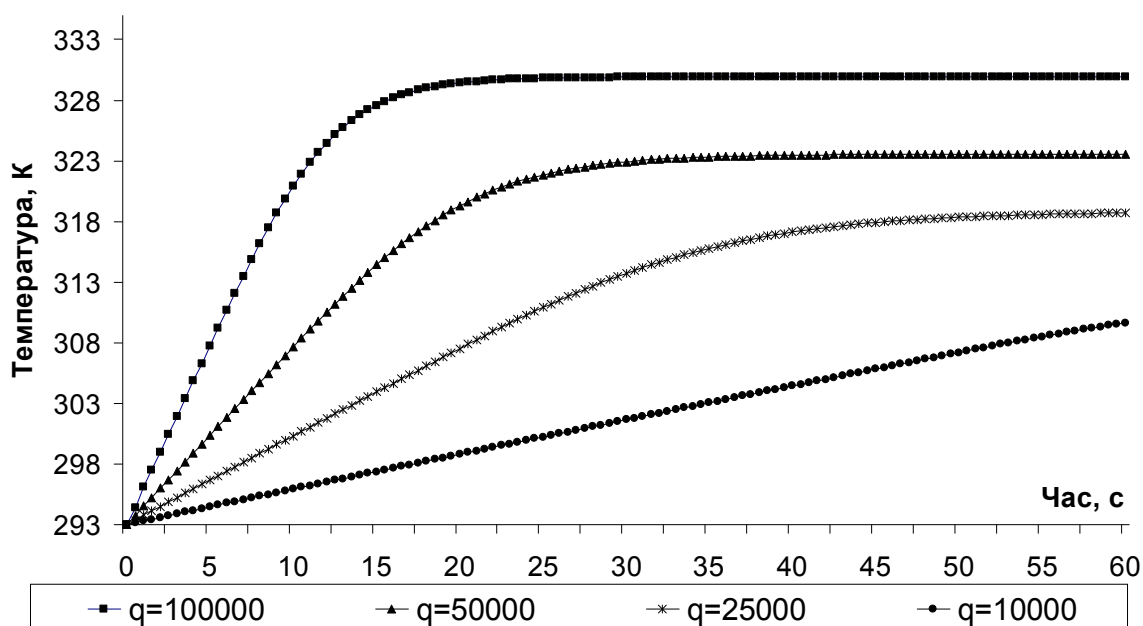


Рис. 5. Вплив потоку на зміну температури для FC-87

Чим більший потік тепла, який нагріває пластину, тим швидше температура пластини дорівнює температурі кипіння. Після використання кипіння для інтенсифікації тепловідведення температура пластини стає такою, при якій потік тепла, який відводиться з поверхні пластини за рахунок кипіння та конвекції, дорівнює потоку тепла, що виділяється тепловиділяючим елементом. Тому чим більший потік тепла, який нагріває тепловідвідну пластину, тим більша різниця температур необхідна при кипінні, щоб його відвести. Чим менша величина потоку q_0'' , тим меншою є температура пластини при зрівноваженні потоків, оскільки для цього необхідна менша різниця температур.

Висновки

Побудовано нелінійну нестационарну модель процесу теплообміну з використанням кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення в МЕП за критичних умов. Модель враховує вплив випаровування рідини під час кипіння на процес тепловідведення в критичних умовах, залежність теплофізичних параметрів та величини потоку тепла, який відводиться в результаті кипіння, від температури. Побудована модель дала змогу дослідити зміну температури в МЕП та зміну потоків тепла, які відводяться з поверхні МЕП, з часом і вплив процесу кипіння на тепловідведення. Показано ефективність використання кипіння рідини для інтенсифікації тепловідведення за критичних умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Reis N. C. MRI investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces under different drying regimes / N. C. Reis Jr., R. F. Griffiths, M. D. Mantle, et. al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – № 49. – P. 951 – 961.
2. Reis N. C. Investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces using magnetic resonance imaging / N. C. Reis Jr., R. F. Griffiths, M. D. Mantle, et. al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – № 46. – P. 1279 – 1292.
3. Gamayunov N. I. Features of vapor transfer in the evaporation of liquids from capillaries in an inhomogeneous temperature field / N. I. Gamayunov, A. A. Lankov, V. L. Malyshev // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*. – May, 1984. – № 5. – P. 65 – 70.
4. Benjamin R. J. Nucleation Site Density in Pool Boiling of Saturated Pure Liquids: Effect of Surface Microroughness and Surface and Liquid Physical Properties / R. J. Benjamin A. R. Balakrishnan // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1997. – №15. – P. 32 – 42.
5. Izmailov Y. G. Non-stationary isothermal evaporation of fluids in a cylindrical chamber / Yu. G. Izmailov, E. A. Utkin, G. P. Vyatkin // *Inzhenerno-fizicheskii Zhurnal*. – 1991. – Vol. 61, No. 5. – P. 790 – 794.
6. Komov A. T. A Physical Model for Prediction of Critical Heat Fluxes in Boiling in Swirling Subcooled Flow under Nonuniform Heating / A. T. Komov // *High Temperature*. – 2000. – Vol. 38, No. 3. – P. 502 – 506.
7. Song C. H. Cooling enhancement in an air-cooled finned heat exchanger by thin water film evaporation / Chan Ho Song, Dae-Young Lee, Sung TackRo // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – № 46. – P. 1241 – 1249.
8. Honda H. Theoretical study of evaporation heat transfer in horizontal microfin tubes: stratified flow model / H. Honda, Y. S. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – № 47. – P. 3971 – 3983.
9. Hall C. A. Semi-analytic solutions for freezing induced by evaporative cooling / Carsie A. Hall, Calvin Mackie // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – № 44. – P. 1161 – 1170.
10. Kuryachii A. P. Modeling of heat and mass transfer in systems of radiation-evaporation thermal protection / A. P. Kuryachii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2001. – Vol. 74, No. 6. – P. 1412 – 1425.
11. Федасюк Д. В. Дослідження впливу випаровування і конвекції на процес відведення тепла з поверхні пластини / Д. В. Федасюк, Т. О. Муха // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. – 2010. – № 686. – С. 255 – 264.
12. Cheng Y. Thermal analysis for indirect liquid cooled multichip module using computational fluid dynamic simulation and response surface methodology / Yingjun Cheng, Gaowei Xu, Dapeng Zhu [and other] // *IEEE transactions on components and packaging technologies*. – 2006. – vol. 29. – № 1. – P. 39 – 46.
13. Ваш источник информации по продукции Intel [Електронний ресурс] / Intel Corporation. – Режим доступу : <http://ark.intel.com/ProductCollection.aspx?series=33897>.
14. Сравнение номеров моделей и характеристик процессоров AMD Phenom [Електронний ресурс] / Advanced Micro Devices, Inc. – 2011. – Режим доступу: <http://www.amd.com/ru/products/desktop/processors/phenom-ii/Pages/phenom-ii-model-number-comparison.aspx>.
15. Федасюк Д. В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв / Д. В. Федасюк. – Львів: Видавництво Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 228 с.
16. High powered chip cooling – Air and Beyond [Електронний ресурс] / M. J. Ellsworth, R. E. Simons // *Electronics Cooling*. – August 2005. Режим доступу до журн. : <http://www.electronics-cooling.com/2005/08/high-powered-chip-cooling-air-and-beyond/>.
17. Incropera F. P. Fundamentals of heat and mass transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine; 6th ed. – New York: John Wiley & Sons, 2007. – 925 p.
18. Heat Transfer in a Thin Plate [Електронний ресурс] / COMSOL. – Режим доступу : <http://www.comsol.com/showroom/gallery/493/>.

Муха Тарас Орестович – асистент кафедри програмного забезпечення, e-mail: muha_taras@rambler.ru, тел. (032) 285-25-78.
Національний університет «Львівська політехніка».